

(67) SfM に基づいた 屋外レーザスキャンの最適計画

北田 祐平¹・安室 喜弘²・檀寛成³・西形達明²・石垣泰輔²・井村誠孝⁴

¹学生非会員 関西大学理工学研究科環境都市工学専攻（〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号）

²正会員 ³非会員 関西大学環境都市工学部（〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号）

E-mail:{k004627, yasumuro}@kansai-u.ac.jp

⁴非会員 大阪大学基礎工学研究科（〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-3）

三次元レーザスキャナによる計測は様々な分野での利用が進んでいるが、効率良く計測を行うためには計測位置の選択が大きく影響する。現場作業者の経験に基づいた方法が主流であり、最適化手法としても次の計測点を逐次的に選択する方法がとられている。一方、事前に計測計画を立てる方法として、数理計画問題としてモデル化して計画を立案する手法が提案されている。この方法では現地の状況を反映した簡易 3D モデルが必要となる。そこで本研究では事前調査に SfM (Structure from Motion) を用いることで手持ちのカメラを使って現地を撮影するだけで、植生や地形の高低差を考慮したレーザスキャナ測量計画を可能にする手法を提案する。また、実地計測を踏まえた評価により確認された有効性について報告する。

Key Words : Structure from Motion, Scan Planning, Laser Scanner, Mathematical Optimization

1. はじめに

レーザスキャナは、計測対象の表面の情報を取得できる三次元計測システムであり、広大な空間において3次元の形状情報を取得するのに適している。建設現場¹⁾²⁾や社会インフラのモニタリング³⁾、災害の事後評価⁴⁾など、広く使用されている。これらの利用場面では“その時”の“ありのまま”の状態の計測を求めている。これらのような屋外利用の場面では限られた時間内で必要な情報を集めることが極めて重要である。スキャナは、計測位置から直接観測が可能な対象物しか計測できないため、物体の表面情報を完全に取得するには、物体の周囲の複数箇所からスキャンしなければならない。屋外広域の構造物の形状計測を行う際のスキャナの計測位置の選択を誤ってしまうと、データの欠損が生じる場合や、データ密度が薄い場合がある。また、その補填のために都度計測回数を増やしてしまうと、時間と労力も増加し、冗長な計測データも増加する。したがって、効率良く計測するための事前計画が必要である。本論文では、対象とする構造物やシーンに対して、現実的な計測作業量を見積り、計測データの品質を考慮して、最適な計測計画の立案を実現することを目的とする。

2. 関連研究・技術

(1) ビュープランニング

レーザスキャナのような光学式 3 次元形状計測において、対象の形状に適応させて計測視点を配置するビュープランニングの問題が検討されてきた。任意形状の物体に対して、1 度の計測で測れる表面の範囲は、基本的には計測してみなければ分からないため、逐次的に、計測済みと未計測の領域に分けて、未計測の領域を最小化する可能性の高い視点(NBV;next best view)を推定する手法が主流である。これらの方法は、ユーザが計測作業を進める上で、次の計測位置の決定において効率化を図るもの⁵⁾⁶⁾や、移動ロボットが自律的に 3 次元地図を作る上での行動計画を自動立案するもの⁷⁾⁸⁾車載システムを用いて 3 次元マップを生成するもの⁹⁾などがある。これらはいずれも、任意の計測位置から計測を開始したり、予め広範囲にわたって粗く計測したりすることで初期計測データを取得し、これを起点として以降のビュープランニングを行うという枠組みを基本としている。しかし、逐次的な試行に基づくことから、特に屋外計測において、作業量の見積りや、計測作業計画を事前に立案することは難しい。

(2) 数理計画法による形状計測プランニング

事前にビュープランニングを行う方法として、現場の平面図に基づく方法¹⁰⁾や、現地の簡易3次元モデルを用いる方法¹¹⁾¹²⁾が提案されている。2次元情報に基づく前者を拡張して3次元情報を考慮可能にしたのが後者である。簡易3次元モデルは、現地の航空写真などを使った写真測量により生成され、3次元空間での見え方をチェックしながら、数理計画法により最も効率よく計測できるレーザスキャナ設置点の数と配置を大域的に最適化する。

以降に、この手法における3次元モデル生成と数理計画問題としての定式化について説明し、付随して残された問題について述べる。

(a) 写真測量に基づいた簡易3次元モデル

写真測量では、異なる視点から撮影した対象物の複数の写真画像から、三角測量の原理に基づいて簡易な3次元モデリングを行うことが出来る¹³⁾。2つ以上の異なる位置から撮影した写真画像を利用して、写真に写っている共通の点を識別する。それぞれの写真の撮影時のカメラ位置から共通点への視線が交わる点を求め、それを頼りに対象点の3次元座標を算出する。現場の写真を撮ることは事前調査の一般的な作業であるため、写真を利用した3次元モデリングはそれほど特別な所作を要求するわけではなく、多くの土木系現場の作業形態に整合性が良いといえる。近年ではストリートビュー（Google Streetview）やグーグルアース（Google Earth）など、誰でも使用できる歩行者視点の写真や航空写真を使用し、作成したモデルを用いることで、3次元空間での見え方をチェックすることが可能になる。

(b) 数理計画法による事前計測計画

檀らの方法でモデル化される数理計画問題は2つの0-1整数最適化問題で構成されている¹⁴⁾。以下の記号を用い、(1)、(2)のように定式化される。

【添字と集合】

$i \in I$: スキャナ設置候補点とその集合

$j \in J$: 計測する物体の表面を構成する三角形とその集合

【変数】

$$x_i := \begin{cases} 0, & \text{候補点}i \text{ を設置点として採り入れない} \\ 1, & \text{候補点}i \text{ を設置点として採り入れる} \end{cases}$$

【パラメータ】

$$d_{ij} := \begin{cases} 0, & \text{三角形}j \text{ は候補点}i \text{ から計測不可能} \\ 1, & \text{三角形}j \text{ は候補点}i \text{ から計測可能} \end{cases}$$

$$a_{ij} := \begin{cases} 0, & d_{ij} = 0 \\ i \text{ から計測できる}j \text{ 上の点の数}, & d_{ij} = 1 \end{cases}$$

r : 測定回数の上限

$$\text{minimize } \sum_{i \in I} x_i$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } & \sum_{i \in I} d_{ij} x_i \geq 1 (\forall j \in J) \\ & x_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in I) \\ \text{minimize } & \sum_{i \in I, j \in J} a_{ij} x_i \\ \text{subject to } & \sum_{i \in I} d_{ij} x_i \geq 1 (\forall j \in J) \\ & \sum_{i \in I} x_i \geq r, \\ & x_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in I) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、(1)は対象をスキャンするための最低回数を求め、(2)は与えられた回数で対象のスキャン数を最大化する計測場所を求める。計測位置 i から対象表面 j について可視性の判定 d_{ij} とスキャン数 a_{ij} の値を計算するためには、計測対象周辺の3Dモデルを用意して、各候補点から壁面の可視性を調べる必要がある。

3. 提案手法

2.(2)項で述べたビュープランニング法では、簡易的な3Dモデルによってスキャナ位置の候補や対象現場の構造物の位置関係などを考慮することが重要な役割を担っている。簡易3Dモデルにより、スキャナからの見通しの障害となる構造物の外形が実際より大きく用意されれば、対象の可視性の条件が厳しくなり、計画の実効性として安全側に見積もることができる。しかしながら、生成される3Dモデルを写真測量法を用いて地図や航空写真から作成すると、撮影視点や解像度が限られている。したがって、植生や屋外に置かれた装置などのような、スキャナ設置候補点から計測対象となる構造物の壁面の可視性を阻む可能性がある詳細な情報の反映が困難である。より現実的な計測計画を作るためには、実際の現場で障害となりうる物体は全て考慮した3Dモデルを作成する必要がある。そこで、現地調査で撮影した画像によるSfMを用いることで、計測対象物や植生などを高低差のある地形を考慮した位置関係を含めて3Dモデルに反映させることを可能にする。

(1) SfM (Structure from Motion)

SfM (Structure from Motion) とは、あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの3次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である¹⁴⁾。この技術は、得られるシーンの3次元形状に着目すればコンピュータビジョンにおける形状復元問題の1解法であり、一方カメラの位置推定に着目すればロボットビジョンにおける自己位置推定手法と捉えることもできる。

(2) 3次元情報の取得

一般的なデジタルカメラを用いて現地状況の撮影を行い、画像の中に対象構造物や植生、地形などを同じ画角に取り込み SfM 技術を使用することで、相互の位置関係を3次元座標値として取得する。この手法は、高価なカメラを必要としないため、オンサイト調査の分野で働いている人々のための大きな可能性を持つことができる。

(3) 3Dモデルの作成

ビュープランニングにおいて最適化計算に必要なパラメータは、計測対象物の3Dモデル、計測対象物周辺の3Dモデル、レーザスキャナ設置候補点の3Dモデルの3要素を構成する三角形メッシュの3次元頂点座標リストである。簡易3Dモデルを作成する際には、SfMから取得した3次元点群情報をトレースすることで、3要素の位置関係を考慮した簡易3Dモデルの作成が可能になる。

4. 実装

本研究では、事前準備において、スキャンの対象となる建物の周辺環境が植生などの障害物や地形の高低差によって詳細な計画が必要とする環境を想定し、大阪府の関西大学にある建物を対象とした。

(1) 三次元点群の取得

一般的なデジタルカメラ(Nikon COOLPIX L820)を使用して構造物周辺を撮影し、画像を取得する。画像測量法はオープンソースのwebサービスであるPhotosynthを用いる。Photosynthにアップロードされた画像は、SfMによって複数の写真から顕著な特徴を抽出し、地物の相対関係を再現する。また、結果として3次元点群の座標情報の抽出を可能にする。図-1で示す様に、現地の動画7分程度から得られた700枚の画像に対してPhotosynthのSfM技術を適用し、3次元の点群座標値として取得した。

(2) 3Dモデルの作成

3次元点群をトレースすることで物理的な寸法に並んでポリゴンを配置する。その際に、点群をインポートできCGモデリングが可能なレンダリングソフトウェアであるblenderを用いて、対応する点群に外接する直方体

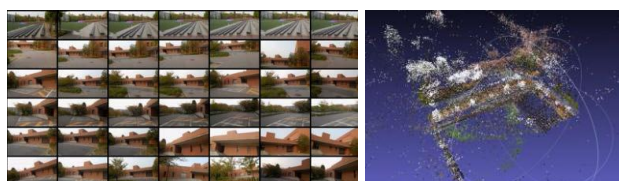


図-1 現地の画像(左)と取得された3次元点群座標値(右)

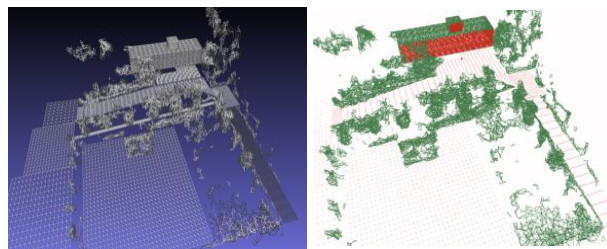


図-2 3Dモデルの統合図(左)と計測位置の最適化結果(右)

を作成した。建物の詳細な形状をモデル化するよりも現実の可視性を安全側で考慮しつつ、正確な位置関係を再現した単純なポリゴンモデルを作成可能である。計測対象物、対象物周辺、スキャナ設置候補点である各要素に対してポリゴンモデルを作成し、それぞれの統合結果を図-2(左)に示す。図-2(右)に示すのは、計測位置の最適化計算をサーバ上で行うことのできるシステム¹⁹⁾に対して、各要素の3次元座標値のパラメータを与えた結果である。緑色メッシュで表される部分は植生や地形などの障害物を表現しており、等間隔に設定された赤色の点が計測候補点を表している。赤色メッシュの部分を計測対象として最適計算を行う。計測候補点の中から選択された、太く強調した赤色の点が計測位置の最適解となっており、今回のケースでは2箇所検出された。計測対象部分から近い位置にある計測点は、木々に囲まれた1階部分の端までの計測を保管しており、遠い位置にある計測点は、2階部分を補うように選択されたと考えられる。

5. ケーススタディ

前章で取得された計測計画に基づいて実地計測を行うことによって、計画の検証を行った。計測機器にはRIEGL製の3DスキャナLMS-Z420iを使用した。図-3(左)の写真にある白い点はレーザスキャナにより取得された点群データの全体図を示す。図-3(右)の写真はターゲット表面の点群の拡大画像を示しており、青色の点が対象物から近い場所からの計測結果であり、黄色の点が対象物から遠い場所からの計測結果である。表-1はスキャンデータがプロジェクトの目標をサポートするかを識別するために使用できるプロジェクト定義マトリックスであり、GSAスキャナ計画ガイドラインに基づいて、計測されたデータ密度のレベルによって分類することがで

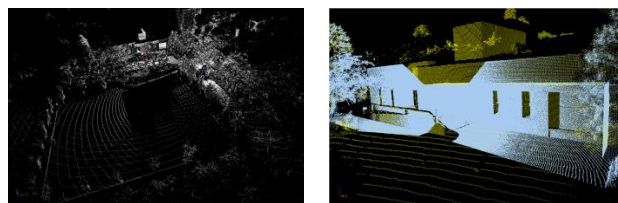


図-3 スキャン結果全体図(左)と計測対象物(右)

表-1 Level of Details and the point cloud resolution
(excerpt from GSA BIM Guide Series)

Level of Detail	Category	Resolution mm x mm (in x in)
Level 1	Point cloud	152 x 152 (6 x 6)
	Plan Elevation Surface model Point cloud	25 x 25 (1 x 1)
Level 2	Elevation Surface model Point cloud	25 x 25 (1 x 1)
	Elevation Point cloud	13 x 13 (½ x ½)
Level 3	Plan Elevation Point cloud	13 x 13 (½ x ½)
	Elevation Point cloud	13 x 13 (½ x ½)
Level 4	Surface model Point cloud	13 x 13 (½ x ½)



図-4 スキャン結果のレベル別分布

きる¹⁶⁾。また、レベルによって分類し着色した結果が図-4である。緑色は点が含まれていない走査欠損領域を示しており、壁面の内側にある緑色の領域はスキャナ装置によって測定できない窓ガラスである。この結果から、壁面上のほとんどの表面が少なくともレベル1の品質で覆われていることがわかる。

6. おわりに

本稿では、手持ちのデジタル（ビデオ）カメラを使用することがレーザスキャンの実用的な計画のために有効であることを示した。また、SfMを用いたスキャン計画は、植生や地形の高低差などの現場の状況を可視性のチェックのために考慮することができ、GSAガイドラインの評価水準を満たすことで計画そのものの信頼性を支援することを示した。現時点での実装では、計測位置の最適化の前にSfMにより点群からのメッシュモデルを作成するための手作業を必要とするため、自動化を図ることが課題である。また、スキャンデータの品質目標を、スキャン計画立案時の最適化指標として設定できるようにすることも考慮する予定である。

参考文献

- 1) Shih N. and Wang P. : Point Cloud Based Comparison between Construction Schedule and AsBuilt Progress: LongRange ThreeDimensional Laser Scanner's Approach, Journal of Architectural Engineering, pp.98-102, 2004.
- 2) Shih N. and Huang S. : 3D Scan Information Management System for Construction Management, Journal of Construction Engineering and Management, pp.134-142, 2006.
- 3) Miller P. E., Mills J. P., Barr S. L., Lim M., Barber D., Parkin G. and Clarke B., Glendinning S. and Hall J. : Terrestrial laser scanning for as-

sessing the risk of slope instability along transport corridors, XX1st ISPRS Congress: Commission V, WG 3, Beijing, pp.495-500, 2008.

- 4) Watson C., Chen S., Bian H., and Hauser, E. : LiDAR Scan for Blasting Impact Evaluation on a Culvert Structure, Journal of Performance of Constructed Facilities, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000318, 2011.
- 5) R. Pitto : A Solution to the Next Best View Problem for Automated Surface Acquisition, IEEE Trans. PAMI, Vol 21, No. 10, pp.1060-1030, 1999.
- 6) Pulli K. : Multiview Registration for Large Data Sets, Proceedings of Second International Conference on 3-D Imaging and Modeling, pp.160-168, 1999.
- 7) Blaer P. S. and Allen P. K. : View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites, Journal of Field Robotics, pp.865-891, 2009.
- 8) Grabowski R., Khosla P. and Choset H. : Autonomous Exploration via Regions of Interest, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1691-1696, 2003.
- 9) Asai T., Kanbara M. and Yokoya N. : Data acquiring support system using recommendation degree map for 3D outdoor modeling, SPIE, Vol. 6491, 2007.
- 10) H. Dan, Y. Yasumuro, T. Ishigaki, T. Nishigata : Shape Measurement Planning of Outdoor Constructions with Mathematical Programming and Its Applications, 10th Int'l Conf. on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 319-328, 2010.
- 11) Dan H., Yasumuro Y., Ishigaki T. and Nishigata T. : Measurement Planning of Three-dimensional Shape by Mathematical Programming, Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp.205-216, 2011.
- 12) H. Dan, Y. Yasumuro, T. Ishigaki, T. Nishigata : Onsite Planning of 3D Scanning for Outdoor Constructions with Mathematical Programming, 12th Int'l Conf. on Construction Applications of Virtual Reality, pp.532-541, 2012.
- 13) Hartley R. and Zisserman A. : Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2004.
- 14) 満上育久 : 私の研究開発ツール第46回 Bundler Structure from Motion for Unordered Image Collections, 映像情報メディア学会誌, 65号, pp.479-482, 2011.
- 15) Yusuke INUI, Yoshihiro YASUMURO, Hiroshige DAN : "A SERVER-CLIENT SYSTEM FOR OPTIMIZED PLANNING OF OUTDOOR 3D LASER SCANNING", The 9th International Symposium on Social Management Systems SSMS2013, University of West Sydney in Parramatta, 2013.
- 16) USA General Service Administration, GSA BIM Guide For 3D Imaging, GAS BIM Guide Series : <http://www.gsa.gov/bim/>, (2014.6.5 入手)